

铁路隧道施工中注浆技术的应用探究

吕方泽

山东交通学院 250357

DOI: 10.32629/ems.v8i2.18502

[摘要] 本文对注浆技术在铁路隧道施工过程中的运用进行较为系统的探索。首先,对注浆技术及浆液类型进行总结。其次,对渗透、压密、劈裂三类常见注浆技术特点进行分析,然后说明它们在填补漏孔、复位偏斜、防渗中的核心地位。最后,对钻孔定位至效果检查等施工关键流程及质量控制要点进行细致梳理,目的是为铁路隧道工程施工安全、高效提供技术参考。

[关键词] 铁路隧道施工; 注浆技术; 应用探究

引言

随着铁路隧道建设不断扩展到复杂地质环境中,注浆技术已成为确保围岩稳定和施工安全的方法。本文从注浆技术基本原理及常见种类入手,着重分析铁路隧道施工过程中功能性应用及施工控制流程,以期促进隧道工程防渗工作、加固、纠偏的效果对于指导现场施工和质量控制有实际意义。

1 注浆技术及浆液概述

注浆技术,也被称为灌浆技术,其核心思想是在特定的压力条件下,利用具有流动性和胶凝特性的浆液材料,通过预设的钻孔和注浆管道进行处理,强行注入地层的裂隙、孔隙、空洞、结构和土体接触界面。浆液在流动、渗透、充填、挤密过程中发生一系列物理、化学过程并最终固化硬化,实现对原地层物理力学性质的改良、水流通道的堵塞、空洞的充填、松散岩土体的加固或既有结构纠偏。该技术效果实现的核心是浆液对地层作用的可控性——浆液必须能有效地喷射到目标区域,并且按照期望凝固^[1]。所以,浆液材料的选择是注浆工程能否成功的首要条件。铁路隧道工程经常使用的注浆浆液大致可以分为两类,一类是水泥基浆液,另一类是化学浆液。水泥基浆液主要使用普通硅酸盐水泥或超细水泥作为胶凝材料,通常会与水按照一定的比例混合,并可以加入膨润土、粉煤灰、外加剂(例如减水剂、速凝剂、早强剂等)等进行改性。其优点是材料来源广泛、成本较低、固结体强度高、耐久性好,适用于裂隙宽度较大(一般大于0.2mm)、注浆压力较高、对于有明确强度需求的加固和堵水情景,例如破碎岩体的加固和衬砌后面的回填。但它的颗粒性又决定它很难穿透细微裂隙及粉细砂层。化学浆液则以各类有机或无机化学材料为主剂,通过化学反应实现胶凝固化,主要包括水玻璃类(硅酸盐)、丙烯酰胺类、聚氨酯类、环氧树脂类等^[2]。

2 铁路隧道常用注浆技术类型

2.1 渗透注浆

渗透注浆就是在注浆压力下浆液像水那样渗透填充岩土体内部连通的孔隙、裂隙,而不损伤地层原有构造,然后胶凝固化使原来疏松的颗粒或者裂隙面黏结在一起。该技术成功应用的关键在于浆液颗粒粒径(或分子链尺寸)必须小于地层孔隙或裂隙的宽度,并且浆液的黏度和凝胶时间需与地层的渗透性相匹配。铁路隧道工程多采用渗透注浆对渗透系数比较大的砂层、砂卵石层、节理,裂隙发育而整体结构尚未遭到破坏的岩体进行加固。如隧道通过富水砂层时用超细水泥浆或者特定化学浆液渗透注浆可使开挖轮廓附近产生固结“结石体”幕布,有效地增强了地层自稳能力及抗渗性能,从而为安全开挖创造条件。其优点是施工后地层仅发生物理性质的改良(孔隙的充填提高粘结力),而总体积和结构变化不大,因此对周围土体的扰动小。但是它的适用性明显受到地层孔隙大小的制约,对于粘性土或者致密岩体来说很难付诸实践^[3]。

2.2 压密注浆

压密注浆技术是一种通过钻孔向软塑到流塑状态的黏性土、回填土等软弱地层中注入极稠、坍落度极低的膏状浆液(一般采用高水灰比水泥土浆)的方法。注浆过程中,浆液会在出口形成“浆泡”,浆泡的体积随浆液不断挤压进入而逐渐变大,并由此向周边土体施加径向挤压力。该挤压力使得相邻土体受到挤压而变得致密、孔隙比降低,但可能会挤出一部分土体孔隙水,从而有效地增加土体密度、承载力、模量^[4]。压密注浆后浆液基本上不会渗入土体孔隙内,而呈较为富集的“球状”或者“脉状”固结体。铁路隧道施工中常采用压密注浆对隧道基底软土进行处理,对隧道洞身穿出的软弱松散带进行加固或对不均匀沉降引起的变形隧道衬砌

结构进行隆起和纠偏。因其挤密效果显著,注浆点附近地表有可能出现隆起现象,需精心设计注浆孔位、次序及压力等,以免对相邻结构物产生负面影响。

2.3 劈裂注浆

劈裂注浆是当注浆压力超过地层的初始劈裂压力(抗拉强度)时,浆液克服地层阻力,在地层中人为地劈裂出新的、方向性强的裂隙或脉状通道中,浆液也相应地填充在这些裂隙中,不断地扩展和伸展,从而构成交织在一起的网状或者板状浆脉固体。这些浆脉犹如“加筋”,对软弱地层进行分割、包裹、连接,使地层的整体性与力学性能得到显著提高。劈裂注浆多用于低渗透性软弱粘性土层、粉土层、构造疏松填土层。铁路隧道施工中劈裂注浆通常用于软弱破碎围岩的超前加固,隧道塌方体的治理和隧道仰拱下软弱地基的补强。如隧道掌子面前超前劈裂注浆可形成一定厚度及强度的加固圈以有效地约束围岩开挖后的松弛变形及预防塌方。劈裂注浆压力一般大于渗透及压密注浆压力,需准确控制压力,在确保有效劈裂的前提下,避免因压力过高而造成地层发生危害、失控劈裂破坏、地面隆起过大。

3 注浆技术在铁路隧道施工中的核心作用

3.1 填补漏孔

隧道工程“漏孔”这一广义概念一般指由于施工或者地质等原因而产生的,对结构稳定不利的各种空隙和缺陷。主要包括:一种是开挖后在围岩内由于节理裂隙发育,局部塌陷而形成松散区及空洞;另一种是初期支护喷射混凝土和围岩由于混凝土收缩,不能紧密结合,出现“背后脱空”现象;在浇注二次衬砌混凝土时,由于模板变形、振捣不密而出现蜂窝、麻面、内部空洞等缺陷;在衬砌结构和防水板间,由于施工工序的原因而出现的缝隙。这些不足的存在大大减弱支护结构和围岩共同的承载能力,造成应力集中并容易诱发衬砌开裂和掉块等病害,从而成为地下水渗透和汇聚的主要通道。注浆技术尤其是回填注浆、衬砌注浆是治理上述缺陷最为直接、最为有效的手段。通过把水泥砂浆或者特殊的灌浆料压注到这些对象的空洞中,它们就能被充分填充致密,从而恢复支护结构和围岩、衬砌和防水层间的密切接触,构成均匀传力整体显著增强结构承载能力与稳定性。如利用“带模注浆”技术在二次衬砌浇筑完成后适时回填拱顶,能有效预防拱部脱空的质量通病。

3.2 复位偏斜度

在隧道施工或运营期间,由于复杂地质条件(如偏压、

软弱地基)、施工误差或后期不均匀沉降等原因,隧道结构(它由开挖轮廓、初期支护、施工完成的衬砌组成)可能出现超出设计允许范围的偏移、沉降或收敛变形,即“偏斜”。这类偏斜如不及时矫正,轻者会影响隧道净空、危及行车安全,重者会造成结构的失稳破坏。注浆技术为解决这一问题提供主动、可控纠偏手段。原理多采用压密注浆或者定向劈裂注浆形成抬升力或者侧向挤压力。当沉降段衬砌需抬升复位后,可以在底部或者一侧布置注浆孔,并通过灌注可控浆液,形成抬升力使结构慢速顺利顶回到设计标高。当隧道水平方向偏移需矫正时,可以向偏移的反方向侧注浆,通过浆液挤压土体产生反向推力逐步实现结构复位。

3.3 防渗

地下水漏失不仅使地表作业环境恶化、机械锈蚀加快、混凝土长期浸润、围岩可溶成分溶蚀、结构强度下降、围岩稳定性下降,寒区甚至有诱发冻胀破坏危险。所以,防渗止水在隧道工程中特别是富水隧道建设中处于中心地位。注浆技术对隧道防渗起到了构建主动防水屏障至关重要的作用,表现为三个层次:一是超前帷幕注浆作用,超前于富水断层或者岩溶发育区掘进,于掌子面前沿隧道轮廓环向施作密注浆孔,灌注浆液后在开挖区周边形成闭合且有一定厚度与强度的低渗透性“止水帷幕”,把绝大部分地下水拦于帷幕外,达到“以堵为主”或者“限量排放”。二是以径向局部注浆为主,对开挖后局部集中涌水点或者渗漏带用径向钻孔注浆封堵以截断水流路径。三是为系统衬砌后方注浆,二次衬砌完成后,后方有计划地回填并固结注浆,既充填间隙,又配合防水层形成多道防线堵塞了由围岩渗入洞中的剩余水流通。通过这种三级注浆防渗体系可以最大限度做到隧道“滴水不漏”,确保隧道长时间干燥运行。

4 铁路隧道注浆施工关键流程与质量控制

4.1 钻孔定位与成孔

钻孔作为注浆施工过程中的第一道工序,钻孔质量的好坏直接影响浆液是否能精确到达目标区域。第一,须根据注浆设计方案(例如帷幕注浆、径向注浆)在现场精确放样,确定每个注浆孔的孔位、倾角、方位角、孔深。钻孔定位容许偏差要从严控制,一般平面位置偏差不得大于10cm,角度偏差不得大于1度。成孔过程需根据地质条件选择合适的钻机(例如,风动凿岩机、液压履带钻机等)和钻具。第二,破碎地层为防止塌孔往往需要跟管钻进或者预埋孔口管的技术。钻孔时,需要对各钻段岩性变化、涌水和掉块情况进行

详细描述,作为后续注浆参数调整的重要基础。成孔时,需采用高压风或者水进行清孔处理,保证孔内不被岩粉、杂物封堵,从而保证注浆管路的平稳安装及浆液的顺利灌注。

4.2 注浆管安装与密封

清孔完成后,应立即安装注浆管(或者直接用钻杆做注浆管)。对深孔或者需要分段注浆时,一般采用花管(管壁上设有出浆小孔)、止浆塞系统等。注浆管连接一定要坚固封闭,以防在高压作用下发生脱开或者漏浆。孔口的封堵是整个注浆系统中的“咽喉”,也是确保注浆压力高效确立和防止浆液沿着孔壁窜冒现象出现的关键。常见密封方法有采用特殊孔口止浆阀、缠麻丝、海带用快硬水泥密封、孔口管法兰处加密封垫片用螺栓固定。封底后需做压水试验以检验封底效果及地层可注性等,并对初始注浆压力、浆液配比等参数的确定有一定借鉴意义。

4.3 浆液配制与性能测试

浆液在制备过程中,一定要严格遵守实验室所规定的配合比,并通过现场工艺试验,优选出最佳参数。要用特制浆液搅拌机充分拌和,以保证各种成分拌和均匀。对双液化学浆而言,需要采用双液注浆泵,并且要保证两路浆在孔口混合器中准确地混合。所制备的浆液需要在投入使用前及注浆期间对浆液的密度、粘度、流动性、凝胶时间、抗压强度等主要性能指标进行定期采样测试。尤其在凝胶时间上,须随注浆扩散半径及单孔注浆量的变化而动态调节,这样不仅可以防止浆液提前固化而阻塞管路,还可以避免浆液损失过远而造成的浪费。各项试验数据均要详细记载,为注浆效果判断及质量问题追溯提供依据。

4.4 注浆作业参数控制与实施

注浆作业在整个过程中处于核心地位,参数控制的好坏直接决定注浆效果。关键控制参数包括注浆压力、注浆流量(速率)、注浆量。注浆压力对浆液扩散起着推动作用,它的设置需要考虑地层条件、注浆方式、埋深、结构承受能力等。压力过低不能使浆液得到有效的扩散;过高的压力会使地层劈裂失去控制,抬动衬砌或者对既有结构造成损害。通常遵循“低压慢注,逐级升压”的策略,并根据流量的变动进行动态调节。注浆流量(速率)影响浆液的扩散形态,初始阶段宜用较大流量打开通道,待压力上升后调小流量,实现稳定渗透或可控劈裂。注浆量是在理论估算的基础上,结合实际吃浆情况进行综合评判,使其满足设计扩散半径的要求或

终止标准。结束标准通常以“终压”和“终量”双控,即达到设计终压后,单位时间进浆量小于某个极小值(如5-10 L/min),并稳定一定时间(如10-15分钟),即可结束该孔注浆。在注浆过程中,压力、流量、浆液配比的变化情况要有连续、完整地记录。

4.5 效果检查、回填与后续处理

注浆施工结束后必须科学地检查和评价其效果,并在一定程度上核实工程质量,确定是否需要补充注浆等必要措施。检验方法有很多,主要有钻孔取芯、直接观测浆液充填、胶结地层、岩芯强度试验等;在检查孔内进行压水试验以确定地层透水率下降幅度评价防渗效果;利用物理探测技术,如地质雷达和声波CT,能够无损地探测浆液的扩散范围以及加固体的完整性。对隧道衬砌后注浆也可采用敲击法协助判断是否充填脱空。对检验不合格者需补孔注浆。全部注浆孔工作结束且效果得到证实时,用干硬性水泥砂浆或者设计所需材料封孔回填以保证孔口致密平整且不遗留空洞。注浆施工过程中的所有技术文件,如设计文档、施工日志、检查报告等,都应当被妥善整理和存档,以便为隧道在运营期间的维护工作提供必要的基础信息。

结语

注浆技术对铁路隧道施工具有防渗、加固、纠偏等多种功能。规范施工流程,对关键环节进行严格把关,可以有效地促进隧道结构稳定性和耐久性。今后应该对注浆工艺和材料进行进一步优化,使其能够适应更加复杂地质条件的要求,促进铁路隧道施工技术不断发展。

[参考文献]

- [1] 邵建勇. 铁路隧道施工中注浆堵水技术的分析[J]. 中国战略新兴产业, 2021(43): 67-69.
- [2] 何永东. 二次衬砌混凝土防脱空带模注浆工艺在铁路隧道施工中的应用[J]. 四川水泥, 2023(2): 233-234.
- [3] 宋瑞占. 注浆技术在铁路隧道施工中的应用分析[J]. 市场调查信息: 综合版, 2022(7): 00185-00187.
- [4] 房玉中, 齐如见, 杨海航, 等. 矿山法施工铁路隧道衬砌拱部预制拼装拱部注浆施工工艺研究[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(S02): 421-427.
- [5] 李志俊. 高原铁路高温热水隧道钻孔注浆施工技术研究[J]. 工程技术研究, 2025, 10(9): 49-51.